

УДК 631.242.34+637.23

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГИДРОДИНАМИКИ И КИНЕТИКИ СБИВАНИЯ СЛИВОК В МАСЛОИЗГОТОВИТЕЛЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С РАБОЧИМ ОРГАНом В ФОРМЕ ЛЕНТЫ МЁБИУСА

**Закир Вагиф Оглы Кулиев**

заведующий лабораторией

vaqifizz@gmail.com

**Камал Гаджи Оглы Якубов**

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник

kamalyaqubov57@gmail.com

**Элман Мухтар Оглы Алиев**

старший научный сотрудник

bozhan@gmail.com

Научно-исследовательский институт «Агромеханика»

г. Гянджа, Азербайджан

**Аннотация.** Проектирование современных маслоизготовителей требует количественного анализа гидродинамики потока сливок вместо эмпирического подбора режимов. В работе исследована трёхмерная структура потока в маслоизготовителе периодического действия с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса. Рабочий орган состоит из двух лент с противоположной закруткой, вращающихся в одном направлении. Гидродинамический анализ выполнен в цилиндрической системе координат с выделением радиальной, тангенциальной и осевой составляющих скорости. Разработана аналитическая модель продолжительности сбивания с учётом частоты вращения, массовой доли жира и геометрии лент. Установлено, что доминирующей является тангенциальная составляющая скорости ( $\approx 46,1\%$ ). Оптимальный диапазон частоты вращения составил 700–900 об/мин.

Предложенная конструкция обеспечивает сокращение времени сбивания в 1,2–3,3 раза по сравнению с традиционным лопастным механизмом при сохранении качества готового продукта.

**Ключевые слова:** сбивание сливок, сливочное масло, гидродинамика потока, вихревое движение, лента Мёбиуса, маслоизготовитель, кинетика процесса.

В проектировании современного оборудования для производства сливочного масла постепенно отходит чисто эмпирический подход к выбору режимов работы. Вместо этого растет стремление основывать проектирование на понимании гидродинамических и структурных процессов, происходящих внутри рабочей емкости оборудования. Это обусловлено не только потребностью в энергоэффективности, но и необходимостью гарантировать воспроизводимость микроструктуры готового продукта. Таким образом, вопрос о том, как организован поток сливок в рабочей емкости и как эта организация влияет на столкновение и слияние жировых шариков, становится все более важным.

Сложность заключается в том, что образование масляного зерна является результатом взаимодействия нескольких групп факторов. Гидродинамика определяет частоту столкновений глобул, физико-химические свойства мембран определяют их готовность к коалесценции, а кристаллизация жира определяет конечную структуру. Многие пытались распутать этот клубок факторов. Например, используя лабораторную модель процесса взбивания, было продемонстрировано, насколько сильно микроструктура масла (размер капель влаги) зависит от характера механического воздействия [1]. На другом уровне анализа было сосредоточено на свойствах самих глобул: продемонстрировали воздействие термической обработки на изменения белкового состава мембран [2] и что модификация этих белков напрямую влияет на реологию взбитых систем [3]. Все эти данные сходятся в одном: гидродинамический режим действует как триггер, превращающий потенциальную нестабильность эмульсии в реальный процесс коалесценции.

Анализ современной научной литературы выявляет значительный дисбаланс в распределении исследовательского внимания. Физико-химические механизмы стабилизации и дестабилизации молочных эмульсий изучены очень подробно. Однако в области проектирования и конструирования мешалок доминирует энергетический подход, примером чего служит исследование, где оптимизация роторно-лопастного механизма привела к снижению

энергопотребления на 24% [4]. Однако эти количественные достижения часто заслоняют понимание структуры потока в рабочей емкости. Вопросы пространственного распределения скоростей, вклада различных компонентов потока и их влияния на коалесценцию остаются по существу нерешенными. Предложенные эмпирические соотношения [5], несмотря на свою практическую ценность, не предоставляют универсального инструмента, связывающего геометрию рабочего элемента с гидродинамической картиной и кинетикой процесса.

Исследования конечной структуры сливочного масла дополняют картину, демонстрируя зависимость распределения влаги и полиморфных характеристик жировых кристаллов от условий механической обработки и параметров кристаллизации [6, 7]. Гидродинамика предшествующей стадии сбивания вносит косвенный, но существенный вклад в этот процесс, создавая начальную неоднородность среды, которая впоследствии определяет формирование текстуры. Аналогичным образом, продолжительность процесса сбивания напрямую влияет на вязкостные характеристики и температуру плавления масла [8]. Однако в существующих методах выбор временных режимов остается в значительной степени эмпирическим и не основан на количественных данных о распределении скоростей в рабочей емкости.

Таким образом, сегодня у нас есть подробная карта физических и химических процессов, а также набор энергетических характеристик для различных смесителей, но пробел остается. Пространственная гидродинамика по-прежнему плохо изучена: вклад различных компонентов скорости (радиальной, тангенциальной, осевой) в общую картину потока и их прямое влияние на продолжительность перемешивания.

Данное исследование призвано частично восполнить этот пробел. Объектом исследования является установка для сбивания сливок с нетривиальной геометрией рабочего элемента — двумя лентами Мёбиуса расположенных одна в другой, скрученными в противоположных направлениях, но вращающимися в одном направлении. Предполагается, что

такая конструкция может создавать более однородное вихревое поле по сравнению с обычными лопастями.

Задачи исследования сформулированы следующим образом:

- провести гидродинамический анализ потока в цилиндрических координатах, количественно оценив вклад каждой компоненты скорости;
- разработать аналитическую модель, связывающую время перемешивания со скоростью вращения, содержанием жира в сливках и параметрами конструкции;
- ввести коэффициент, позволяющий корректно сравнить эффективность предлагаемой конструкции с традиционной лопастной конструкцией;
- на основе полученных данных определить рациональный диапазон скоростей вращения, обеспечивающий баланс между интенсивностью перемешивания и сохранением формовочной структуры.

**Цель исследования:** количественная оценка структуры потока и ее влияния на кинетику сбивания сливок, а также определение рациональных рабочих параметров установки с учетом технологических и энергетических ограничений.

Предложенный подход направлен на установление взаимосвязи между гидродинамическими характеристиками потока и эффективностью процесса сбивания, что позволяет перейти от эмпирических методов к вычислительному проектированию рабочих органов установки.

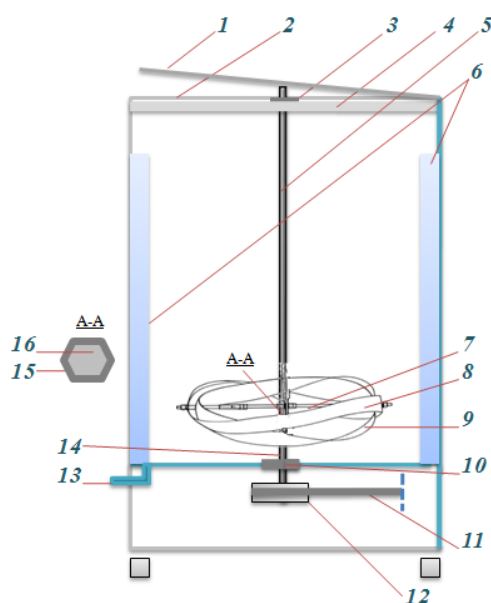
### **Материалы и методы исследования**

#### *Физическая модель процесса.*

Рабочий орган маслоизготовителя периодического действия, механизм сбивания (рис. 1), выполнен в виде двух лент, внешней 8 и внутренней 9, концы которых развёрнуты на  $180^{\circ}$  (ленты Мёбиуса). При этом завивка внутренней 9 ленты направлена против завивки внешней 8 ленты. Обе ленты вращаются в одном и том же направлении. Они жёстко закреплены к стержню 7, жёстко соединённой с валом 5, верхняя часть которой соединена с самоцентрирующимся подшипником с вращающейся опорой 3,

обеспечивающий вращение вокруг центральной оси, установленной на кронштейне 4, расположенной в верхней части рабочей емкости 2, а нижняя часть соединена посредством втулок 16 и 17 с промежуточным валом 14 установленной расположенной на дне рабочей емкости 2 уплотнительным узлом 10. На промежуточном вале 14 установлен шкив 12 с клиновидным ремнем 11, которая соединяется с электродвигателем (на схеме не указана). Рабочая емкость 2 имеет крышку 1, сливной патрубков 13 и отбойники 6.

Данная конструкция обеспечивает стабильное вращение и эффективную работу механизм сбивания.



1 – крышка; 2 – рабочая емкость; 3 – самоцентрирующий подшипник с вращающейся опорой; 4 – кронштейн; 5 – вал; 6 – отбойники; 7 – стержень; 8 – внешняя лента; 9 – внутренняя лента; 10 – уплотнительный узел; 11 – клиновидный ремень; 12 – ведомый шкив; 13 – сливной патрубок; 14 – промежуточный вал; 15 и 16 – втулки.

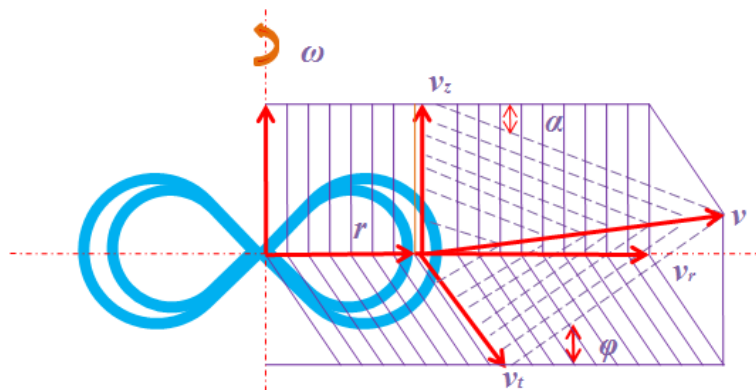
Рисунок 1 - Маслоизготовитель периодического действия с рабочим органом в форме двойной ленты Мёбиуса.

#### Основные параметры системы:

- диаметры лент: внешняя лента -  $D_1 = 0,220\text{м}$ , внутренняя лента -  $D_2 = 0,210\text{м}$ ;
- ширина лент: I вариант -  $b_1 = 0,03\text{ м}$ , II вариант -  $b_2 = 0,04\text{ м}$ , III вариант -  $b_3 = 0,05\text{ м}$ ;
- частота вращения механизма сбивания: I вариант -  $n_1 = 700\text{ об/мин}$ , II вариант -  $n_2 = 800\text{ об/мин}$ , III вариант -  $n_3 = 900\text{ об/мин}$ .

- диаметр рабочей емкости:  $D_E = 0,36$  м;
- высота рабочей емкости:  $H = 0,5$  м;
- объем сливок:  $V = 0,022$  м<sup>3</sup>;
- массовая доля жира в сливках - 25 %; 30 %; 35 %; 40 %; 45 %; 50 %;

Расчет скоростных компонентов потока сливок.



$v_r$  - радиальная составляющая суммарной скорости потока, м/с;  $v_t$  – тангенциальная составляющая суммарной скорости, м/с;  $v_z$  - осевая составляющая суммарной скорости, направленная вдоль оси вращения, м/с;  $v$  - суммарной (полная) скорость движения жидкости в произвольной точке обрабатываемого объема, м/с;  $\alpha$  - угол отклонения вектора суммарной скорости от вертикальной плоскости, проходящей через центральную ось обрабатываемого объема, °;  $\varphi$  - угол отклонения вектора скорости от горизонтальной плоскости, перпендикулярной центральной оси рабочего органа (плоскости его вращения), °.

Рисунок 2 - Схема разложения суммарной скорости потока сливок в рабочем объеме на составляющие компоненты.

Гидродинамическая картина движения сливок в установке с предлагаемым рабочим органом формируется в условиях трехмерного потока, которые лучше всего описываются в цилиндрической системе координат  $(r, \theta, z)$  [9]. В этом случае поле скоростей представляется как суперпозиция трех компонент: радиальной  $v_r$ , тангенциальной  $v_t$  и осевой  $v_z$  (рис. 2). Такое разложение позволяет перейти от качественного описания движения среды к количественной оценке пространственной структуры потока.

Для анализа кинематики течения сливок используется представление течения с помощью линий тока, отражающих траектории элементарных объемов жидкости. В зависимости от преобладающей компоненты скорости в рабочей емкости формируются характерные картины течения, определяющие

перераспределение энергии и интенсивность взаимодействия между жировыми глобулами [10, 11, 12]:

- Радиальный поток характеризуется движением сливок от центра к периферии емкости или в обратном направлении. Интенсивность этого потока определяется радиальной составляющей скорости  $v_r$  (м/с) и в значительной степени зависит от диаметра наружной ленты рабочего механизма ( $D_1 = 0,220$ м). Этот конструктивный элемент формирует радиальный градиент давления и играет решающую роль в движении сливок из центральной зоны к периферии. Величина радиальной скорости выражается следующим образом:

$$v_r = C_r \omega r_r, (м/с) \quad (1)$$

где  $\omega = (2\pi n)/60$  - угловая скорость, рад/с;  $C_r$  - эмпирический коэффициент, учитывающий влияние конструкции на формирование радиального потока ( $C_r \approx 0,35 - 0,45$ );  $r_r$  - радиус внешней ленты, м ( $r_r = D_1/2$ ).

Радиальный перенос играет важную роль в обновлении объема жидкости вблизи поверхности рабочих элементов и способствует вовлечению периферийных слоев в зону интенсивного перемешивания.

- Тангенциальный поток характеризуется вращательным движением сливок тангенциально по окружности. Тангенциальная скорость  $v_t$  (м/с) в основном определяется диаметром внутренней ленты рабочего механизма ( $D_2 = 0,210$ м). Расположение внутренней ленты внутри внешнего, а также их противоположные направления закручивания способствуют формированию интенсивной внутренней циркуляции потока, в которой основной крутящий момент передается в радиальном направлении. Тангенциальная скорость описывается выражением:

$$v_t = C_t \omega r_t, (м/с) \quad (2)$$

где  $C_t$  — коэффициент, характеризующий эффективность передачи крутящего момента и структурные потери ( $C_t \approx 0,85 - 0,95$ );  $r_t$  — радиус внутренней ленты, м ( $r_t = D_2/2$ ).

Именно тангенциальное движение определяет формирование устойчивых вихревых структур, обеспечивающих многократное взаимодействие частиц дисперсной фазы.

- Поток, направленный вдоль оси вращения, характеризуется продольным движением сливок вдоль оси рабочего механизма, при котором сливки входят и выходят из межленточного пространства. Формирование этой составляющей обусловлено развитием вихревых структур и турбулентных возмущений в рабочей емкости. Осевая скорость оценивается по выражению:

$$v_z = C_z \omega h, (м/с) \quad (3)$$

где  $C_z$  — коэффициент интенсивности осевого потока ( $C_z \approx 0,3$ );  $h$  — высота слоя сливок, м ( $h = 0,22$  м).

Осевая циркуляция обеспечивает массообмен между верхним и нижним слоями, что способствует выравниванию структуры и температуры среды.

- Векторная сумма радиальной, тангенциальной и осевой компонент скорости образует полную скорость жидкости  $v$  (м/с) в любой точке рабочей емкости, определяемая следующим соотношением:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2 + v_z^2}, (м/с) \quad (4)$$

Для характеристики пространственной ориентации потока используются углы отклонения результирующего вектора скорости.

Основное направление и траектория движения сливок характеризуются углом  $\alpha$  ( $^\circ$ ), который определяет отклонение результирующего вектора скорости от вертикальной плоскости, проходящей через центральную ось рабочей емкости:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{v_r^2 + v_t^2}}{v_z}, (^\circ) \quad (5)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} \alpha), (^\circ) \quad (6)$$

Поведение потока относительно плоскости вращения рабочего элемента определяется углом  $\varphi$  ( $^\circ$ ), который характеризует отклонение вектора скорости от горизонтальной плоскости:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{v_z}{v_t}, (^{\circ}) \quad (7)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} \varphi), (^{\circ}) \quad (8)$$

Введение этих параметров позволяет перейти от скалярного описания скоростей к анализу направления движения, имеющее фундаментальное значение при оценке устойчивости гидродинамического режима.

Таким образом, представленная система уравнений обеспечивает возможность количественного анализа трехмерной структуры потока сливок и позволяет установить связь между геометрическими параметрами рабочего органа, режимами его работы и формированием гидродинамических условий, определяющих эффективность процесса взбивания.

*Расчёт продолжительности сбивания сливок с использованием рабочего механизма на основе лент Мёбиуса.*

Прямое аналитическое определение времени сбивания  $t$  (мин) в установках периодического действия, сопряжено со значительными трудностями из-за сложного характера взаимодействия гидродинамических, физико-химических и структурных факторов. В настоящее время отсутствуют универсальные зависимости, пригодные для точного прогнозирования продолжительности процесса сбивания. В инженерной практике для этих целей используются эмпирические зависимости, обобщающие результаты экспериментальных исследований [13–18, 19].

Существующие соотношения связывают продолжительность сбивания с тремя основными группами параметров: массовой долей жира в сливках  $\mathcal{J}$  (%), скоростью вращения рабочего механизма,  $n$  (об/мин), и конструктивными особенностями смесительного устройства. В общем виде это соотношение можно выразить следующим образом:

$$t_m = \frac{K}{n^{m_f(\mathcal{J})F}}, (\text{мин}), \quad (9)$$

где  $K$  - эмпирический коэффициент, учитывающий совокупное влияние конструкции аппарата, реологических свойств сливок и условий процесса, для рассматриваемой конструкции принимается  $K = 2800$ ;  $n$  - скорость вращения

рабочего механизма, *об/мин*, ( $n = 700-900 \text{ об/мин}$ );  $m$  - эмпирический показатель степени, отражающий влияние турбулентных эффектов ( $m = 0,6-0,8$ , в расчетах принимается  $m = 0,75$ );  $f(\mathcal{J})$  - коэффициент, учитывающий изменения вязкости сливок в зависимости от содержания жира (табл. 1);  $F$  - расчетный коэффициент, характеризующий интенсивность механического воздействия.

Таблица 1

Коэффициент  $f(\mathcal{J})$  в зависимости от жирности сливок.

Жирность сливок, (%)	$f(\mathcal{J})$
25	0,925
30	1,00
35	1,075
40	1,150
45	1,225
50	1,300

Для количественного учета геометрических факторов, определяющих площадь контакта между перемешивающим устройством и обрабатываемой средой, был введен коэффициент эффективности конструкции  $F$  для рабочего органа в виде двух лент Мёбиуса. Он рассчитывается как отношение эффективной площади перемешивания  $S_m$  предлагаемой конструкции к соответствующему значению для классического лопастного механизма  $S_k$ :

$$F = \frac{S_m}{S_k}, \quad (10)$$

Для двух лент Мёбиуса общая площадь перемешивания определяется геометрией обеих лент:

$$S_m = 2b(D_1 + D_2)\pi, \text{ (м}^2\text{)}, \quad (11)$$

где  $b$  - ширина ленты,  $m$  (рассматриваемые значения:  $b_1 = 0,03 \text{ м}$ ,  $b_2 = 0,04 \text{ м}$ ,  $b_3 = 0,05 \text{ м}$ );  $D_1$  - диаметр внешней ленты,  $m$  ( $D_1 = 0,220 \text{ м}$ );  $D_2$  - диаметр внутренней ленты,  $m$  ( $D_2 = 0,210 \text{ м}$ ).

Для классического лопастного механизма с  $N$  лопастями:

$$S_k = NbL \text{ (м}^2\text{)}, \quad (12)$$

где  $N$  — число лопастей;  $L$  — длина лопасти, принимаемая как  $L = 0,5D_E$ , м ( $D_E = 0,360$  м - диаметр рабочей емкости).

В расчетах используется значение  $S_k \approx 0,09$  м<sup>2</sup>.

Время сбивания для классического лопастного механизма рассчитывается по аналогичной формуле:

$$t_k = \frac{K}{n^{m_f(\text{Ж})}}, (\text{мин}) \quad (13)$$

где  $K$  — эмпирический коэффициент для традиционной конструкции (в расчетах используется значение  $K = 3250$ ).

Для сравнительной оценки эффективности предлагаемого и классических рабочих органов вводится коэффициент эффективности  $K_{\text{Э}}$ , определяемый как отношение времени перемешивания для классического механизма ко времени перемешивания для предлагаемого механизма, скорректированное с учетом разницы в зонах перемешивания:

$$K_{\text{Э}} = \frac{S_M}{S_k} \cdot \frac{t_k}{t_M}, \quad (14)$$

Интерпретация этого коэффициента однозначна: когда  $K_{\text{Э}} > 1$ , предлагаемый рабочий орган обеспечивает более высокую эффективность процесса сбивания по сравнению с традиционным; когда  $K_{\text{Э}} < 1$ , его эффективность ниже.

Таким образом, предложенная модель позволяет учитывать влияние на продолжительность процесса сбивания не только рабочих параметров (скорость вращения, содержание жира), но и геометрии рабочего органа. Включение коэффициента  $F$  облегчает переход от обобщенных эмпирических соотношений к более детальному описанию процесса, учитывающему специфические особенности формирования гидродинамического поля внутри рабочей емкости.

### Результаты исследований и их обсуждение

*Количественная оценка гидродинамической структуры потока и составляющих скоростного поля.*

На основе полученных данных установлены зависимости между суммарной скоростью потока сливок  $v$  и его составляющими - тангенциальной скоростью  $v_t$ , радиальной скоростью  $v_r$  и осевой скоростью  $v_z$  - и скоростью вращения рабочего механизма  $n$  (рис. 3). Полученные зависимости позволяют количественно охарактеризовать изменения гидродинамического режима в рабочей емкости при изменении рабочих параметров.

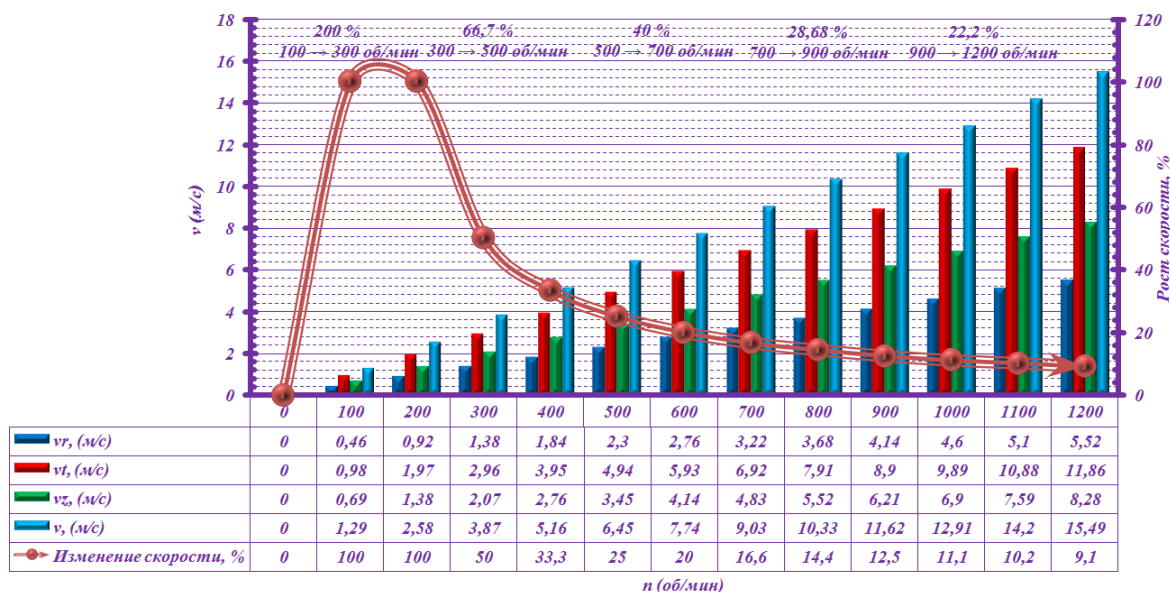


Рисунок 3 - Зависимость суммарной скорости  $v$  (м/с) и её тангенциальной  $v_t$  (м/с), радиальной  $v_r$  (м/с) и осевой  $v_z$  (м/с) составляющих от частоты вращения рабочего механизма  $n$  (об/мин).

Суммарная конечная скорость потока  $v$  (м/с), отражающая интегральную интенсивность движения среды, увеличивается с увеличением скорости вращения рабочего элемента. В исследованном диапазоне  $n = 100 \rightarrow 1200$  об/мин её значение варьируется в пределах  $v = 1,291 \rightarrow 15,49$  м/с. Таким образом, 12 - кратное увеличение скорости вращения сопровождается сопоставимым увеличением скорости потока, что указывает на значительное усиление гидродинамического эффекта на дисперсную систему.

Характер изменения скорости носит нелинейный характер. В низкочастотном диапазоне ( $n = 100 \rightarrow 600$  об/мин) увеличение скорости происходит относительно равномерно, тогда как при переходе к более высоким значениям ( $n = 600 \rightarrow 1200$  об/мин) наблюдается увеличение градиента зависимости. В частности, в диапазоне  $n = 100 \rightarrow 300$  об/мин скорость почти

удваивается ( $v = 1,291 \rightarrow 3,873 \text{ м/с}$ ), после чего относительная скорость увеличения постепенно уменьшается. Такое поведение может быть связано с увеличением гидродинамических потерь и изменением структуры потока по мере перехода системы к более интенсивным режимам.

Максимальное значение полной предельной скорости  $v = 15,49 \text{ м/с}$ , достигается при скорости вращения  $n = 1200 \text{ об/мин}$ , что указывает на возможность интенсивного механического воздействия на структуру сливок и морфологию жировых шариков в процессе сбивания.

Анализ структуры поля скоростей показывает, что тангенциальная составляющая вносит наибольший вклад в общую скорость. Тангенциальная составляющая  $v_t \text{ (м/с)}$  составляет большую часть кинетической энергии потока и определяет характер циркуляции сливок. В диапазоне  $n = 100 \rightarrow 1200 \text{ об/мин}$  её значение изменяется в пределах  $v_t = 0,98 \rightarrow 11,86 \text{ м/с}$ . Во всём диапазоне исследованных режимов  $v_t$  превышает другие составляющие скорости и составляет в среднем около 46,1% от общей скорости. Тот факт, что тангенциальная составляющая превышает радиальную составляющую в 2–3 раза, указывает на формирование устойчивого вращательного движения, которое обеспечивает многократное перемещение частиц внутри объёма и увеличивает вероятность их взаимодействия.

Радиальная составляющая  $v_r \text{ (м/с)}$  вносит меньший вклад в структуру потока и составляет в среднем около 21,6% от общей скорости  $v \text{ (м/с)}$ . По мере увеличения скорости вращения в диапазоне  $n = 100 \rightarrow 1200 \text{ об/мин}$  это значение возрастает в диапазоне  $v_r = 0,46 \rightarrow 5,52 \text{ м/с}$ . В отличие от тангенциальной составляющей, изменение  $v_r$  практически линейно, что указывает на более стабильную связь с геометрическими параметрами рабочего тела. Радиальный перенос обеспечивает циркуляцию сливок между центральной и периферийной зонами, создавая условия для интенсивных столкновений жировых шариков и их последующего слияния.

Осевая составляющая  $v_z \text{ (м/с)}$  занимает промежуточное положение, составляя в среднем около 32,3% от общей скорости. В исследуемом диапазоне

частот ее значение варьирует в пределах  $v_z = 0,69 \rightarrow 8,28 \text{ м/с}$ . Осевая циркуляция способствует перераспределению массы по высоте емкости, обеспечивая участие различных слоев сливок в процессе перемешивания и стабилизацию температуры и структурного состояния системы.

Пространственная ориентация потока характеризуется углами отклонения результирующего вектора скорости. Угол  $\alpha = 57^\circ$ , определяющий отклонение от вертикальной плоскости, остается практически постоянным во всем диапазоне частот вращения. Это указывает на пропорциональное изменение радиальной и осевой компонент скорости и сохранение структуры потока при изменении режима работы.

Аналогично, угол  $\varphi = 34^\circ$ , характеризующий отклонение от плоскости вращения, также не показывает существенных изменений. Этот факт подтверждает стабильное преобладание тангенциальной компоненты и указывает на сохранение пространственной организации потока при увеличении частоты вращения.

Общие результаты показывают, что использование рабочего элемента в виде двойной ленты Мёбиуса создает стабильную трехмерную структуру потока с выраженной циркуляцией в тангенциальном и осевом направлениях. С увеличением скорости вращения интенсивность гидродинамического эффекта возрастает; однако чрезмерное увеличение скорости может сопровождаться увеличением механических нагрузок на дисперсную фазу.

С технологической точки зрения это требует ограничения верхнего диапазона частот. При  $n < 400 \text{ об/мин}$  интенсивность перемешивания недостаточна, что снижает эффективность коалесценции. В то же время, при  $n > 1000 \text{ об/мин}$  чрезмерная турбулентность может привести к разрушению образующихся жировых агрегатов. В диапазоне  $n = 600 \rightarrow 900 \text{ об/мин}$  достигается сбалансированное сочетание параметров скорости: тангенциальная скорость  $v_t = 4,94 \rightarrow 7,91 \text{ м/с}$ , радиальная скорость  $v_r = 2,3 \rightarrow 4,14 \text{ м/с}$ , осевая скорость  $v_z = 4,83 \rightarrow 6,216 \text{ м/с}$ , а полная скорость  $v = 6,45 \rightarrow$

11,62 м/с. Эти значения обеспечивают достаточную интенсивность перемешивания при сохранении структурной стабильности системы.

С учетом сочетания гидродинамических и технологических факторов целесообразно установить оптимальный диапазон скоростей вращения рабочего механизма в пределах  $n = 700 \rightarrow 900$  об/мин. В этом диапазоне достигается эффективный баланс между интенсивностью потока, энергопотреблением и условиями формирования стабильной структуры масла.

*Аналитическая оценка продолжительности сбивания и сравнительная оценка эффективности*

Продолжительность процесса сбивания является ключевым технологическим параметром, определяющим производительность процесса и существенно влияющим на формирование структуры масла. Она зависит не только от скорости вращения рабочего органа  $n$  (об/мин), но и от сочетания факторов, включая геометрию и конструкцию механизма, содержание жира в сливках  $J$  (%) и условия коалесценции жировых шариков.

Увеличение скорости вращения, как правило, приводит к сокращению времени сбивания за счет интенсификации гидродинамических процессов. Однако при превышении определенного порогового уровня наблюдается противоположный эффект, связанный с нарушением механизма коалесценции и частичным разрушением образующихся жировых агрегатов. Это указывает на необходимость выбора рационального диапазона рабочих параметров, обеспечивающего баланс между интенсивностью воздействия и сохранением структуры продукта.

Расчетные данные показывают, что использование рабочего органа в виде двойной ленты Мёбиуса способствует более равномерному распределению сливок в рабочей емкости и формированию стабильной трехмерной структуры потока. Это приводит к увеличению числа эффективных столкновений между жировыми шариками и ускоряет их агрегацию.

Сравнительный анализ эффективной зоны перемешивания показал, что интенсивность механического воздействия существенно зависит от ширины

ленты рабочего органа. По мере увеличения ширины ленты  $b = 0,03 \rightarrow 0,05$  м коэффициент  $F = S_m/S_k$  увеличивается от 0,9 до 1,5 (табл. 2), отражая расширение активной зоны взаимодействия между сливками и рабочими элементами.

Таблица 2

Конструктивный коэффициент эффективности  $F = S_m/S_k$ .

Ширина ленты Мёбиуса (м)	$S_m$ (м <sup>2</sup> )	$S_m/S_k$
0,03	0,081	0,9
0,04	0,108	1,2
0,05	0,135	1,5

Увеличение ширины ленты сопровождается увеличением интенсивности перемешивания, однако этот эффект нелинейный и имеет тенденцию к насыщению в определенной точке.

Анализ зависимостей (рис. 4, 5) показывает, что продолжительность сбивания уменьшается с увеличением скорости вращения, ширины ленты и массовой доли жира. Эта закономерность объясняется ускорением процессов коалесценции, увеличением площади контакта жировых шариков и изменением реологических свойств системы.



Полученные результаты подтверждают, что предложенная конструкция обеспечивает более интенсивный гидродинамический эффект при сохранении стабильности формовочной структуры.

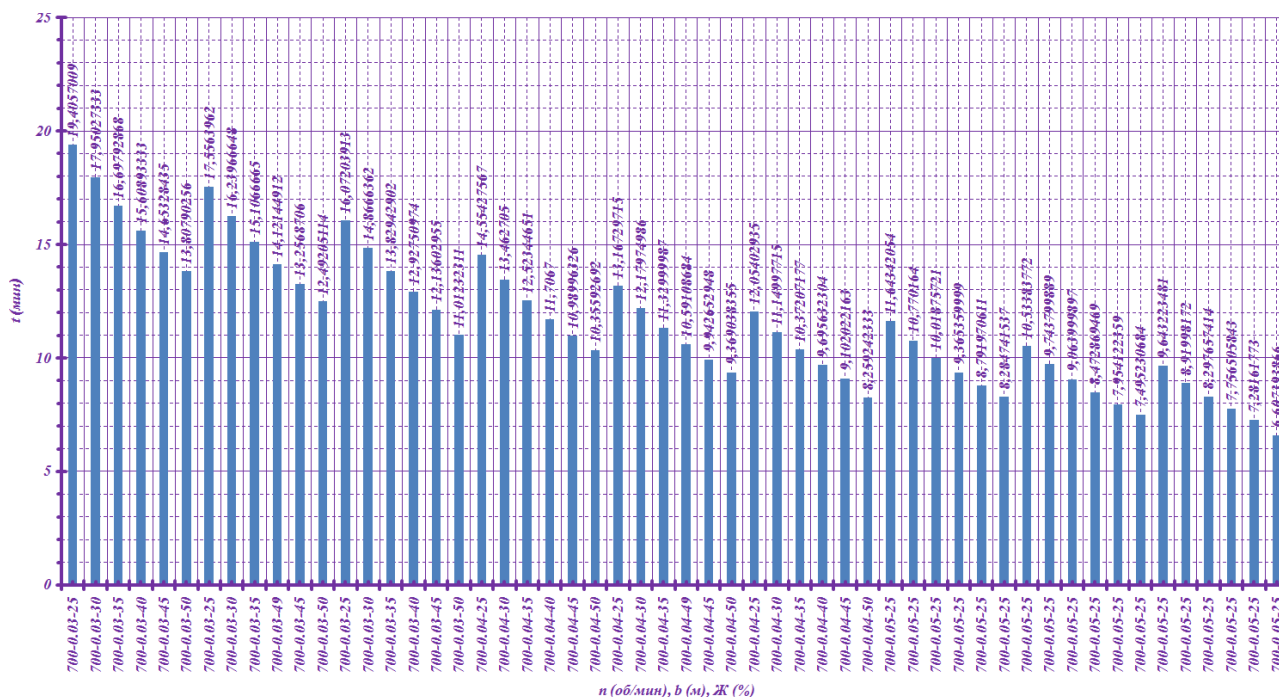


Рисунок 5 - Зависимость продолжительности процесса сбивания сливок от массовой доли жира Ж (%), частоты вращения рабочего механизма n (об/мин) и ширины ленты b (м).

При выборе оптимальных рабочих параметров необходимо учитывать ограничения, связанные с качеством продукции. При скоростях вращения  $n \leq 700 \text{ об/мин}$  интенсивность перемешивания недостаточна, что снижает эффективность коалесценции. В то же время, при  $n \leq 1000 \text{ об/мин}$  чрезмерная турбулентность приводит к увеличению механического напряжения и потенциальному разрушению жировых агрегатов.

Анализ показал, что наиболее благоприятные условия достигаются в диапазоне  $n = 800 \rightarrow 900 \text{ об/мин}$ , где обеспечивается равномерное распределение потока при умеренных энергозатратах. С практической точки зрения оптимальным можно считать значение  $n = 800 \text{ об/мин}$ .

Увеличение ширины ленты ( $b = 0,03 \rightarrow 0,04 \rightarrow 0,05 \text{ м}$ ) приводит к повышению эффективности за счет расширения зоны перемешивания; однако после  $b = 0,04 \text{ м}$  темпы роста снижаются. Это позволяет нам рекомендовать

диапазон  $b = 0,04 \rightarrow 0,05$  м как оптимальный с точки зрения проектирования.

Увеличение содержания жира в сливках ( $\mathcal{J} = 25-50$  %) сопровождается сокращением времени сбивания, однако увеличение вязкости системы приводит к увеличению гидродинамического сопротивления. Следовательно, оптимальным диапазоном с технологической и энергоэффективной точки зрения является содержание жира  $\mathcal{J} = 30-40$  %, при котором достигается наилучшее сочетание интенсивности процесса и стабильности.

Таким образом, предлагаемый рабочий орган на основе двойной ленты Мёбиуса обеспечивает значительное сокращение времени сбивания при сохранении качества продукта. Этот эффект достигается за счет создания более равномерного и интенсивного гидродинамического поля, что подтверждает потенциал его применения в установках периодического действия.

**Заключение.** В данной работе представлен теоретический анализ гидродинамических и кинетических характеристик процесса отделения сливок в маслобойке периодического действия, оснащенной рабочим органом в виде двойной ленты Мёбиуса. Предложена математическая модель, позволяющая количественно описать пространственную структуру потока в цилиндрической системе координат на основе разложения скорости на радиальную, тангенциальную и осевую составляющие.

Установлено, что формирование результирующего движения определяется в первую очередь тангенциальной составляющей, доля которой в структуре полной скорости составляет приблизительно 46,1%. Вклады осевой и радиальной составляющих достигают 32,3% и 21,6% соответственно, что указывает на выраженный трехмерный характер потока. Увеличение скорости вращения рабочего органа сопровождается значительным увеличением гидродинамической активности и приводит к приблизительно 12-кратному увеличению полной скорости потока в исследуемом диапазоне рабочих параметров.

Показано, что диапазон скоростей вращения  $n = 700 \rightarrow 900$  об/мин обеспечивает рациональный баланс между интенсивностью перемешивания и сохранением формирующейся структуры жировых агрегатов. В этих условиях значения компонент скорости достигают:  $v_t = 6,92 \rightarrow 8,9$  м/с,  $v_z = 4,83 \rightarrow 6,21$  м/с,  $v_r = 3,22 \rightarrow 4,14$  м/с, при суммарной скорости  $v = 9,03$  м/с  $\rightarrow 11,62$  м/с, что создает благоприятные условия для коалесценции жировых шариков и образования масляных капель.

Аналитическая оценка продолжительности процесса показала, что использование рабочего органа в виде двойной ленты Мёбиуса обеспечивает более равномерное распределение сливок в рабочей емкости и повышение интенсивности механического воздействия. В зависимости от ширины ленты ( $b = 0,03 \rightarrow 0,05$  м) коэффициент эффективности конструкции варьируется от 1,2 до 3,3, что соответствует сокращению продолжительности сбивания в 1,2–3,3 раза по сравнению с традиционными лопастными механизмами.

Результаты подтверждают, что предложенная конструкция рабочего органа повышает эффективность процесса сбивания за счет создания стабильного трехмерного гидродинамического режима. Этот подход может быть применен в инженерном проектировании маслобоек периодического действия для повышения их производительности и энергоэффективности.

### Список литературы:

1. Gregersen S. B., Boesgaard L. M., Neofytos D. D., Andersen M. E., Andersen U., Corredig M. A simple and robust method for laboratory-scale preparation of butter // JDS Communications. 2024. Vol. 5, № 6. P. 528–530. DOI: 10.3168/jdsc.2024-0571.
2. Hansen S. F., Petrat-Melin B., Rasmussen J. T., Larsen L. B., Wiking L. Impact of industrial cream heat treatments on the protein composition of the milk fat globule membrane // Journal of Dairy Research. 2020. Vol. 87, № 1. P. 89–93. DOI: 10.1017/S0022029919000955.

3. Wang Z., Liang G., Chen W., Qie X., Fu L., Li X., He Z., Zeng M., Goff H. D., Chen J. Effects of soy proteins and hydrolysates on fat globule coalescence and whipping properties of recombined low-fat whipped cream // *Food Biophysics*. 2022. Vol. 17, № 3. P. 324–334. DOI: 10.1007/s11483-021-09714-7.
4. Yashin A., Polyvynnyi Y. Results of research on justification the device for producing ecologically pure butter // *Scientific Papers. Series A: Agronomy*. 2020. Vol. 63, № 1. P. 632–636.
5. Datir R. P., Ravindra M. R., Manjunatha M., Sharma M. Optimization studies on mixing of curd and ingredients during lassi (stirred curd) manufacturing // *Indian Journal of Dairy Science*. 2022. Vol. 75, № 2. P. 107–116.
6. Huan H., Shao Y., Cui L., Yu M., Jin J., Jin Q., Wang X. Characteristics of dry fractionated fraction of anhydrous butter // *China Oils and Fats*. 2025. Vol. 50, № 10. P. 122–128. DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.240377.
7. Kazama R. et al. Characterization of plant-based milk-derived “Fujiharu Butter”: comparison with butter and butter-like substitutes // *Journal of Food Science*. 2026. Vol. 91, № 1. Art. e70857. DOI: 10.1111/1750-3841.70857.
8. Lee J. H., Kim Y. Effects of manufacturing conditions on physical characteristics of recombined butter and quality of butter and sponge cakes // *Journal of Culinary Science and Technology*. 2022. Vol. 20, № 3. P. 197–212. DOI: 10.1080/15428052.2020.1824831.
9. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / пер. с польск. И. А. Щупляка. Л. : Химия, 1975. С. 91–96.
10. Мельников В. И. О некоторых гидродинамических особенностях работы мешалок // *Труды НИИХиммаш*. 1954. № 16. С. 88–104.
11. Мельников В. И. Об учёте некоторых конструктивных и гидродинамических факторов при расчёте мешалок // *Труды НИИХиммаш*. 1959. № 29. С. 126–150.
12. Мельников С. В. О движении жидкости в мешалке // *Труды НИИХиммаш*. 1954. № 16. С. 105–120.

13. Арсеньева Т. П. Технология молока и молочных продуктов. Ч. 2. Технология сливочного масла: учеб.-метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 87 с.
14. Вышемирский Ф. А. Маслоделие в России (история, состояние, перспективы). Углич, 1998. 589 с.
15. Каменская Н. В., Матюшев В. В. Технология производства масла: метод. указания. Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2005. 40 с.
16. Крусь Г. Н., Храмцов А. Г., Волокитина З. В., Карпычев С. В. Технология молока и молочных продуктов. М.: КолосС, 2003. 316 с.
17. Моргунова Н. Л. Реология пищевых систем и текстурный анализ: методические указания для выполнения практических работ. Саратов: Саратовский ГАУ, 2016. 44 с.
18. Пьяникова Э. А. Технологическое оборудование молочного и мясного производства: методические указания по выполнению практических работ. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. 169 с.
19. Стригин В. Н., Парфёнов В. С., Яшин А. В., Стригин С. В. К вопросу инженерного расчёта маслоизготовителя периодического действия // Нива Поволжья. 2009. № 2(11). С. 67-71.

**UDC 631.242.34+637.23**

**THEORETICAL FOUNDATIONS OF HYDRODYNAMICS AND  
KINETICS OF CREAM CHURNING IN A BATCH BUTTER CHURN WITH  
A MOBIUS STRIP WORKING ELEMENT**

**Zakir Vagif Ogly Kuliyeв**

head of the laboratory

vaqifizz@gmail.com

**Kamal Haji Ogly Yakubov**

candidate of technical sciences, associate professor, leading researcher

kamalyaqubov57@gmail.com

**Elman Mukhtar Ogly Aliyev**

senior researcher

bozhan@gmail.com

Scientific Research Institute "Agromechanics"

Ganja, Azerbaijan

**Abstract.** The design of modern butter-making equipment requires a transition from empirical operating conditions to a quantitative analysis of cream flow hydrodynamics. This study investigates the three-dimensional flow structure in a batch butter churn equipped with a working element in the form of a double Möbius strip. The mixing mechanism consists of two oppositely twisted Möbius strips rotating in the same direction. Hydrodynamic analysis was performed in a cylindrical coordinate system by decomposing the total velocity vector into radial, tangential, and axial components. An analytical model for predicting churning duration was developed considering rotational speed, fat content, and geometric parameters of the strips. The tangential velocity component was found to dominate the flow field, contributing approximately 46.1% of the total velocity, while the axial and radial components accounted for 32.3% and 21.6%, respectively. The optimal rotational speed range was determined to be 700–900 rpm. The proposed design reduced churning time by 1.2–3.3 times compared with a conventional paddle mechanism while maintaining product quality.

**Keywords:** cream churning, butter production, flow hydrodynamics, vortex motion, Möbius strip, butter churn, process kinetics.

Статья поступила в редакцию 20.05.2026; одобрена после рецензирования 19.06.2026; принята к публикации 30.06.2026.

The article was submitted 20.05.2026; approved after reviewing 19.06.2026; accepted for publication 30.06.2026.